

Penyederhanaan Analisa Bahaya Arc flash Menggunakan Kurva Batasan Energi Pada Bandara Internasional Juanda

Yoga Firdaus, Margo Pujiantara, Arif Musthofa

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail : margo@ee.its.ac.id ; arif@ee.its.ac.id ; yoga.firdaus13@mhs.ee.its.ac.id ;

Abstrak - Teknik penyederhanaan analisis digunakan untuk untuk penentuan *personal protective equipment* (PPE) dari bahaya busur api (*arc-flash*) dengan berdasarkan IEEE std. 1584-2002 dan *overcurrent protective device* (OCPD). Tidak seperti persamaan penyederhanaan dalam IEEE 1584, teknik analisis ini berpotensi dapat diterapkan untuk semua jenis perangkat pelindung arus lebih pada setiap sistem kelistrikan yang berada dalam jangkauan persamaan empiris IEEE 1584. Saat sebuah metode tidak tepat menghitung tingkat energi insiden dan batas pelindung api (*flash-protection*) pada bus, maka tidak dapat menentukan tingkat PPE yang dibutuhkan secara akurat dan batas jarak pelindung api (*flash-protection*) yang maksimal untuk memungkinkan pekerja melindungi diri secara memadai terhadap bahaya busur api. Studi aktual mengenai penyederhanaan analisa busur api dilakukan pada Bandara Internasional Juanda. Pada hasil akhir dari analisa busur api dengan menggunakan metode kurva batasan energi didapatkan proses penentuan kategori PPE yang lebih singkat daripada standart IEEE 1584-2002.

Kata kunci: busur api, kurva batas energi, *personal protective equipment*.

I. PENDAHULUAN

DEWASA ini karakterisasi potensi bahaya *arc flash* dalam sistem tenaga listrik telah menyebabkan peningkatan kesadaran akan bahaya yang dihadapi oleh orang-orang yang bekerja dekat dengan peralatan yang terkena [1]. Sebuah penilaian bahaya dari *arc flash* harus dilakukan dalam rangka untuk menentukan tingkat *personal protective equipment* (PPE) sebagai kebutuhan dalam pekerjaan agar dapat melindungi pekerja secara memadai. Analisa dari bahaya *arc flash* dapat menggunakan prosedur dan persamaan yang terdapat dalam IEEE 1584 [2]. Studi bahaya *arc flash* sering dilakukan bersamaan dengan arus hubung singkat dan koordinasi proteksinya. Studi hubung singkat diperlukan untuk mendapatkan arus *bolted* gangguan tiga fasa. Sedangkan studi koordinasi proteksi diperlukan untuk menentukan waktu pada peralatan proteksi dalam mengisolasi ketika terjadi gangguan hubung singkat [4]. Analisis *arc flash* membutuhkan penentuan tingkat arus hubung singkat dan evaluasi karakteristik *overcurrent protective device* (OCPD), studi sistem perlu diperluas untuk mencakup peralatan ini [1] [4].

Metode yang digunakan untuk menganalisa fenomena *arc flash* pada Tugas Akhir ini adalah menggunakan kurva batasan energi (*energy boundary curves*). Secara umum, metode ini mempersingkat analisa penentuan kategori PPE yang ditentukan dari insiden energi yang dihasilkan oleh fenomena *arc flash*. Jika perhitungan tersebut diterapkan pada sistem kelistrikan yang terdapat banyak bus, maka

perhitungan tersebut membutuhkan waktu yang lama [3]. Berdasarkan hal tersebut maka digunakan perhitungan *arc flash* dengan menggunakan metode kurva batas energi. Dengan menggunakan metode kurva batas energi maka data yang diperlukan lebih sedikit dan waktu pengerjaannya lebih singkat [1] [5].

II. LANDASAN TEORI

A. Arc flash

Berdasarkan *National Fire Protection Association* (NFPA) 70E-2004, *arc flash* adalah kondisi yang berbahaya akibat adanya pelepasan energi yang disebabkan oleh bunga api listrik [4]. Bunga api listrik tersebut timbul karena adanya arus gangguan atau arcing fault pada sebuah sistem kelistrikan. Penyebab arus gangguan sangat bermacam-macam misalnya adalah kegagalan mekanik, kegagalan isolasi, debu, korosi serta kesalahan pekerja yang bekerja pada peralatan bertegangan. Selain *arcing fault*, level energi yang dipancarkan oleh *arc flash* juga bergantung pada beberapa faktor diantaranya adalah tegangan, jarak pekerja dari titik *arcing*, dan durasi waktu yang dibutuhkan oleh perangkat proteksi untuk melokalisasi adanya gangguan [5].

Saat insiden energi *arc flash* terjadi maka akan muncul pembakaran dari *arc flash*, temperatur yang panas mencapai >35.0000 fahrenheit, tekanan akibat adanya ledakan, suara ledakan yang berbahaya, serta gas beracun. Hal tersebut tentu sangat berbahaya karena menyebabkan kerusakan pada peralatan, luka bakar dan hingga kematian pada orang yang berada dekat dengan ledakan. Oleh karena itu level energi *arc flash* harus diminimalkan sesuai parameter kategori energi berdasarkan NFPA 70E. Dengan tingkat energi *arc flash* yang sesuai maka dapat ditentukan *personal protective equipment* (PPE) bagi pekerja [5].

B. Perhitungan Energi Arc flash Menggunakan Standart IEEE 1584-2002

Pada metode ini, hal pertama yang harus diperhitungkan adalah mencari nilai dari arus arcing fault. Persamaan untuk menghitung dari arus arcing fault sendiri tergantung dari besarnya level tegangan bus.

Untuk level tegangan kurang dari 1kV, persamaan arus arcing fault adalah :

$$lg I_a = K + 0,662 lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V (lg I_{bf}) - 0,00304 G (lg I_{bf})$$

Untuk level tegangan 1kV – 15kV, perhitungan arus *arcing fault* menggunakan persamaan :

$$Lg I_a = 0,00402 + 0,983 lg I_{bf} \quad (1)$$

Maka nilai I_a dapat diperoleh :

$$I_a = 10^{lg I_a} \quad (2)$$

Keterangan :

- lg = \log_{10}
 I_a = arus *arcing* (kA)
 K = konstanta untuk konfigurasi terbuka = -0,153 dan konstanta untuk konfigurasi box = -0,097
 $lg I_{bf}$ = *bolted fault current* pada gangguan tiga fase (*symmetrical RMS*) (kA)
 V = tegangan sistem (kV)
 G = jarak celah antar konduktor (mm)

Setelah nilai *arcing current* diketahui maka nilai dari *incident energy* normalisasi dapat dihitung. Dalam perhitungan besar energi yang normal, menggunakan referensi waktu *arcing* dengan durasi 0,2 detik dan jarak dari titik *arcing* ke manusia sebesar 610 mm. Persamaan yang digunakan adalah :

$$lg E_n = K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G \quad (3)$$

Keterangan :

- E_n = *incident energy normalized* (J/cm²)
 $K1$ = -0,792 untuk konfigurasi terbuka (*no enclosure*)
 -0,555 untuk konfigurasi box (*enclosed equipment*)
 $K2$ = 0 untuk sistem *ungrounded and high-resistance grounded* -0,113 untuk sistem *grounded*
 G = jarak/celah antar konduktor (mm)

Untuk mendapatkan nilai G (jarak antar konduktor) dapat mengikuti standar yang sudah ada. Peralatan yang digunakan dalam sistem kelistrikan. Dalam tabel 1 dijelaskan untuk jarak celah bus pada beberapa peralatan lain dengan referensi dari IEEE 1584-2002.

Tabel 1
Data Jarak Celah Bus (Jarak Bus)

Kelas Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)
6-15kV Switchgear	153
5kV Switchgear	102
Low voltage switchgear	32
Low voltages MCCs and	25
Cable	13
Other	Not required

Setelah itu besar energi E_n dapat diketahui :

$$E_n = 10^{lg E_n} \quad (4)$$

Setelah nilai E_n didapatkan, untuk menghitung besar insiden energi E digunakan persamaan :

$$E = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (5)$$

Keterangan :

- E = *incident energy* (J/cm²)
 C_f = faktor pengali 1,0 untuk tegangan diatas 1kV, dan 1,5 untuk tegangan dibawah 1kV
 E_n = *incident energy normalized*
 T = waktu *arcing* (detik)
 D = jarak kerja (mm)
 X = jarak exponent

Untuk memenuhi semua parameter-parameter dalam menghitung besarnya insiden energi (E) dapat melihat pada tabel 2. Parameter yang dapat dicari dalam tabel ini yaitu jarak celah antar konduktor (G), jarak eksponen (x), dan jarak kerja (D). Adapun nilai dari parameter-parameter yang dimaksud adalah sebagai berikut:

Tabel 2
Data Parameter yang Dibutuhkan Untuk Perhitungan Insiden Energi

Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Jarak celah antar konduktor (mm)	Jarak eksponen	Jarak kerja (mm)
0,208 – 1	Open air	10–40	2	-
	Switchgear	32	1,473	455
	MCC and panels	25	1,641	455
	Cable	13	2	455
> 1 – 5	Open air	102	2	-
	Switchgear	13–102	0,973	610
	Cable	13	2	455
	Open air	13–153	2	-
> 5 – 15	Switchgear	153	0,973	910
	Cable	13	2	455

Ketika level tegangan berada diatas 15kV, maka untuk menghitung insiden energi dapat menggunakan metode Lee.

$$E = 2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \quad (6)$$

Keterangan :

- E = *incident energy* (J/cm²)
 V = level tegangan (kV)
 t = waktu *arcing* (detik)
 D = jarak kerja (mm)
 I_{bf} = *bolted fault current*

C. Metode Perhitungan Arc flash dengan Kurva Batasan Energi

Pengertian insiden energi menurut IEEE 1584 didefinisikan sebagai jumlah energi yang besar di permukaan, pada jarak tertentu dari sumber, yang dihasilkan selama terjadinya busur listrik. Pada tegangan 1kV sampai dengan 15 kV besarnya insiden energi dalam sistem tenaga listrik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E = 4,184 C_f E_n \frac{t}{0,2} \frac{610^x}{D^x} \quad (J/cm^2) \quad (7)$$

Keterangan:

- C_f = Faktor perhitungan berdasarkan pada tegangan sistem (1,5 untuk tegangan dibawah 1kV dan 1,0 untuk 1-15kV)
 E_n = Insiden energi saat keadaan normal (J/cm²)
 t = Lamanya gangguan *arcing* (detik)
 D = Jarak pekerja dari sumber *arc* (millimeter)
 x = Jarak eksponen berdasarkan tabel 4 IEEE 1584

Nilai dari E_n dan t akan bergantung pada besarnya arus gangguan pada lokasi yang dipertimbangkan dan karakteristik dari peralatan proteksi arus lebih (OCPD) pada

bagian *upstream*. Persamaannya (7) dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$t = \frac{E}{A_1 E_n} \text{ (detik)} \quad (8)$$

Dimana A_1 adalah konstanta, dituliskan sebagai berikut:

$$A_1 = 4,184 \frac{C_f}{0,2} \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \quad (9)$$

IEEE 1584 menjelaskan *incident energy* normalisasi (E_n) sebagai berikut:

$$\log E_n = K_1 + K_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011 G \quad (10)$$

Keterangan:

K_1 = konstanta yang berhubungan dengan peralatan (-0,792) untuk konfigurasi "open-air"; -0,555 untuk peralatan tertutup)

K_2 = konstanta yang tergantung pada grounding sistem (-0,113 untuk sistem dengan *grounding*; 0 untuk sistem yang tidak digrounding atau untuk sistem dengan impedansi *grounding*)

I_a = arus gangguan *arc*ing (kA),

G = jarak bus antar konduktor (mm).

Dengan menggabungkan persamaan (8) dengan persamaan (10) maka diperoleh persamaan kurva batas energi sebagai berikut:

$$t = \frac{E}{A_1 A'_2 I_a^{1,081}} \text{ (detik)} \quad (11)$$

Dimana A_2 adalah konstan yang dituliskan sebagai berikut :

$$A_2 = K_1 + K_2 + 0,0011 G \quad (12)$$

$$A'_2 = 10^{A_2} \quad (13)$$

Setelah konstanta didefinisikan berdasarkan pada peralatan dan konfigurasi sistem, nilai insiden energi E dapat dipilih berdasarkan kategori 1-4 PPE sesuai NFPA 70E-2004, dan persamaan (11) dapat digunakan untuk menentukan hubungan arus-waktu yang sesuai dengan tingkat energi insiden yang dipilih. Seperti ditunjukkan dalam kurva yang menghubungkan poin arus-waktu sesuai dengan tingkat insiden energi yang diberikan muncul linear pada grafik log-log. Persamaan (11) dapat diterapkan dilokasi dalam kisaran IEEE 1584 dengan range penerapan (208V - 15 kV, tiga fase, dan dengan tingkat arus bolted fault 700A-106 kA).

Untuk lokasi yang berada di luar jangkauan persamaan (2.8), nilai tegangan diatas 15kV, metode Lee dapat digunakan untuk menentukan kurva batas energi. Sehingga insiden energi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E = 2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \left(\frac{J}{cm^2} \right) \quad (14)$$

Keterangan:

V = tegangan sistem (kV)

I_{bf} = nilai arus bolted fault (kA)

t = lama arus *arc flash* (detik)

D = jarak pekerja (milimeter)

Maka persamaan kurva batas energinya menjadi sebagai berikut:

$$t = \frac{E D^2}{2,142 \times 10^6 V I_{bf}} \quad (15)$$

Perbedaannya dengan persamaan (11), persamaan (15) berdasarkan pada arus *bolted fault*, tetapi nilai arus gangguan *arc*ing masih diperlukan untuk menentukan lamanya waktu arus *arc*ing. Jumlah energi yang dihasilkan *arc-flash* tergantung dari level tegangan tempat arus gangguan terjadi, jarak pekerja dengan sumber *arc*ing dan waktu yang dibutuhkan peralatan pengaman arus lebih untuk menghilangkan dan mengisolir gangguan.

D. Flash Protection Boundary

Persamaan untuk perhitungan jarak aman perlindungan berdasarkan IEEE 1584 mengacu pada besarnya insiden energi normalisasi dari *arc flash*. Namun ketika menggunakan analisa metode kurva batas energi, nilai tepat mengenai insiden energi normalisasi tidak dihitung. Bagaimanapun akhirnya untuk menghitung jarak aman pekerja tetap harus dilakukan. Perhitungannya kali ini mengacu pada besarnya nilai insiden energi pada tiap-tiap kategori. Sehingga yang diperoleh adalah nilai jarak maksimum untuk setiap masing-masing kategori.

Perhitungan level insiden energi (E_{WD}) untuk sistem tegangan antara 1-15kV pada jarak kerja (D_{WD}) adalah :

$$E_{WD} = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D_{WD}^x} \right) \quad (16)$$

Sedangkan perhitungan level insiden energi (E_B) pada jarak aman perlindungan (D_B) adalah.

$$E_B = 4,184 C_f E_n \left(\frac{t}{0,2} \right) \left(\frac{610^x}{D_B^x} \right) \quad (17)$$

Jika persamaan (16) diatas dibagi dengan persamaan (17) maka :

$$\frac{E_B}{E_{WD}} = \left(\frac{D_B}{D_{WD}} \right)^{-x} \quad (18)$$

Sehingga untuk mencari jarak aman tiap kategori PPE :

$$D_B = \frac{D_{WD}}{x \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} \quad (19)$$

Sedangkan untuk sistem lebih dari 15 kV sebagai berikut:

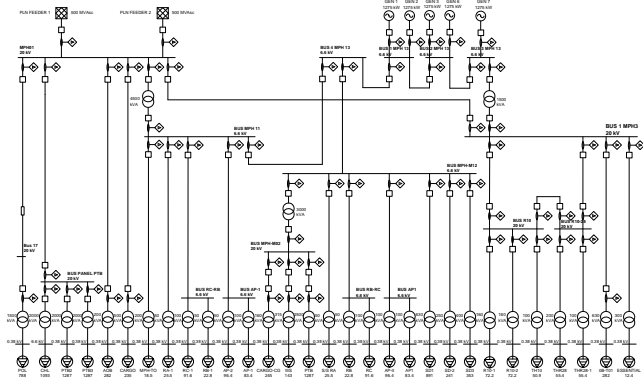
$$D_B = \frac{D_{WD}}{2 \sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} \quad (20)$$

III. SISTEM KELISTRIKAN BANDARA INTERNASIONAL JUANDA

Sistem kelistrikan Bandara Internasional Juanda merupakan sistem yang terdiri dari 2 sumber yaitu dari PLN sebesar 20kV menggunakan 2 feeder utama yang terhubung dengan Main Power House utama sebagai sumber utama untuk menyuplai seluruh sistem kelistrikan Bandara dan menggunakan 5 buah generator dengan kapasitas masing-masing 1500 kVA sebagai sumber cadangan. Generator hanya digunakan apabila PLN mengalami gangguan dan hanya menyuplai sistem yang vital dalam jangka waktu tertentu. Sistem kelistrikan Bandara Internasional Juanda sampai saat ini masih mengandalkan suplai dari PLN sebesar 20 kV, karena sudah adanya kesepakatan kerja antara pihak PT. Angkasa Pura I sebagai pengelola Bandara Internasional Juanda dengan pihak PT. PLN (Persero) sebagai penanggung jawab unit kerja distribusi PLN di Bandara Internasional Juanda yang merupakan konsumen prioritas utama dalam pemakaian listrik.

Pada sistem yang ada di Bandara Internasional Juanda dalam operasinya dilengkapi dengan beberapa peralatan

seperti transformator, relay, circuit breaker yang digunakan untuk masing-masing beban dengan kategori tertentu. Adapun sistem kelistrikan perusahaan ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Kelistrikan Bandara Internasional Juanda

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA

A. Hasil Simulasi Arc flash

Analisa yang dilakukan kali ini adalah untuk mengetahui nilai dari insiden energi *arc flash* dengan menggunakan metode IEEE 1584-2002. Selain nilai insiden energi *arc flash*, dari analisa ini juga akan didapatkan nilai *arcing current*, *flash protection boundary*, dan kategori dari nilai insiden energi *arc flash*. Nilai – nilai tersebut akan digunakan sebagai dasar penentuan pemakaian *personal protective equipment* (PPE) yang harus digunakan petugas ketika menangani gangguan dengan menggunakan standar NFPA 70E. Berikut ini adalah beberapa bus yang akan di analisa :

- Bus MPH 11
- Bus RC-RB
- Bus 4 MPH 13
- Bus MPH-M12
- Bus AP1
- Bus MPH M01
- Bus 1 MPH 3
- Bus R10
- Bus R10-28

Tabel 3
Hasil simulasi Arc flash sebelum menggunakan relay diferensial

ID BUS	Tegangan (kV)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	PPE
MPH 11	6,6	13,036	0,565	12,611	3
RC-RB	6,6	13,036	0,160	3,571	1
Bus4 MPH13	6,6	13,036	0,518	11,562	3
MPH-M12	6,6	13,036	0,360	8,035	3
AP1	6,6	13,036	0,165	3,683	1
MPH M01	20	16,290	0,570	114,808	>4
Bus1 MPH3	20	16,290	0,565	113,801	>4
R10	20	16,290	0,365	73,517	>4
R10-28	20	16,290	0,365	73,517	>4

Tabel 4 Hasil simulasi Arc flash setelah menggunakan relay diferensial

ID BUS	Tegangan (kV)	Arus Arcing (kA)	FCT (s)	Insiden Energi (cal/cm ²)	PPE
MPH 11	6,6	13,036	0,565	12,611	3
RC-RB	6,6	13,036	0,160	3,571	1

Bus4 MPH13	6,6	13,036	0,518	11,562	3
MPH-M12	6,6	13,036	0,360	8,035	3
AP1	6,6	13,036	0,165	3,683	1
MPH M01	20	16,290	0,127	25,579	4
Bus1 MPH3	20	16,290	0,127	25,579	4
R10	20	16,290	0,127	25,579	4
R10-28	20	16,290	0,127	25,579	4

B. Perhitungan Menggunakan Metode Kurva Batas

Energi

Pada perhitungan *arc flash* menggunakan metode kurva batasan energi ini, hal yang harus dilakukan pertama kali adalah mendapatkan kurva setiap kategori PPE. Kurva ini menunjukkan hubungan arus – waktu, dan garis kurva ini didapatkan dari persamaan yang tetap mengacu pada IEEE 1584 – 2002. Pada tiap bus yang dianalisa, terdapat 2 level tegangan yang diambil. Yaitu bus pada level tegangan 1 – 15 kV dan bus dengan tegangan lebih dari 15 kV.

1. Penentuan Kurva Batasan Energi Pada Level Tegangan 1 – 15 kV

Sesuai dengan standart IEEE 1584 – 2002, pada perhitungan *arc flash* menggunakan metode kurva batasan energi, persamaan hubungan arus dan waktu yang digunakan untuk level tegangan 1 – 15 kV adalah sebagai berikut :

$$A_1 = 4,184 \frac{cf}{0,2} \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$= 4,184 \frac{1}{0,2} \left(\frac{610^{0,973}}{910^{0,973}} \right)$$

$$= 14,176$$

$$A_2 = k_1 + k_2 + (0,0011 \times G)$$

$$= -0,555 + 0 + (0,0011 \times 153)$$

$$= -0,388$$

$$A_2' = 10^{A_2}$$

$$= 10^{-0,3876}$$

$$= 0,410$$

Berdasarkan tabel NFPA 70E-2004 untuk kategori 0 PPE nilai E adalah 8,36J/cm² maka persamaannya,

$$t = \frac{E}{A_1 A_2' I a^{1,081}}$$

$$t = \frac{8,36}{14,176 \times 0,410 \times I a^{1,081}}$$

$$t = 1,437 \times I a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 1 nilai E = 16,74 J/cm² maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A_2' I a^{1,081}}$$

$$t = \frac{16,74}{14,176 \times 0,410 \times I a^{1,081}}$$

$$t = 2,877 \times I a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 2 nilai E = 33,47 J/cm² maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A_2' I a^{1,081}}$$

$$t = \frac{33,47}{14,176 \times 0,410 \times I a^{1,081}}$$

$$t = 5,752 \times I a^{1,081}$$

Untuk PPE kategori 3 nilai E = 104,6 J/cm² maka,

$$t = \frac{E}{A_1 A_2' I a^{1,081}}$$

$$t = \frac{104,6}{14,176 \times 0,410 \times I_{bf}^{1,081}}$$

$$t = 17,976 \times I_{bf}^{1,081}$$

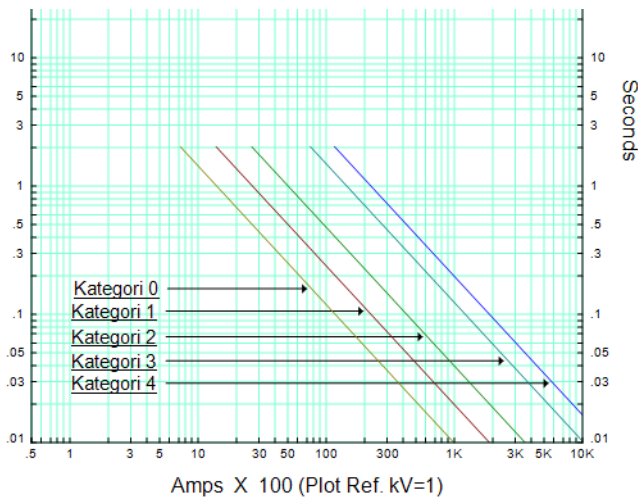
Untuk PPE kategori 4 nilai E = 167,36 J/cm² maka,

$$t = \frac{E}{A1 A2' I_{bf}^{1,081}}$$

$$t = \frac{167,36}{14,176 \times 0,410 \times I_{bf}^{1,081}}$$

$$t = 28,762 \times I_{bf}^{1,081}$$

Persamaan – persamaan diatas merupakan persamaan hubungan arus-waktu untuk setiap kategori PPE dengan standart insiden energi berdasarkan tabel NFPA 70E-2004. Setiap persamaan tersebut akan diubah menjadi kurva garis, hasil dari *plotting* kurva merupakan kurva batasan energi seperti yang ditunjukkan gambar 2 berikut:



Gambar 2. Plotting kurva batasan energi untuk tegangan 1-15kV

2. Penentuan Kurva Batasan Energi Pada Level Tegangan Lebih Dari 15kV

Pada perhitungan *arc flash* dengan menggunakan metode kurva batasan energi, untuk level tegangan lebih dari 15 kV persamaan yang digunakan adalah dengan menggunakan metode Lee. Untuk Kategori 0 PPE, Berdasarkan tabel NFPA 70E-2004 nilai E adalah 8,36 J/cm² maka persamaannya,

$$t = \frac{ED^2}{2,142 \times 10^6 VI_{bf}}$$

$$t = \frac{8,36 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$

$$t = 0,1616 \times I_{bf}^{-1}$$

Untuk PPE kategori 1 nilai E = 16,74 J/cm² maka,

$$t = \frac{ED^2}{2,142 \times 10^6 VI_{bf}}$$

$$t = \frac{16,74 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$

$$t = 0,324 \times I_{bf}^{-1}$$

Untuk PPE kategori 2 nilai E = 33,47 J/cm² maka,

$$t = \frac{ED^2}{2,142 \times 10^6 VI_{bf}}$$

$$t = \frac{33,47 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$

$$t = 0,647 \times I_{bf}^{-1}$$

Untuk PPE kategori 3 nilai E = 104,6 J/cm² maka,

$$t = \frac{ED^2}{2,142 \times 10^6 VI_{bf}}$$

$$t = \frac{33,47 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$

$$t = 2,022 \times I_{bf}^{-1}$$

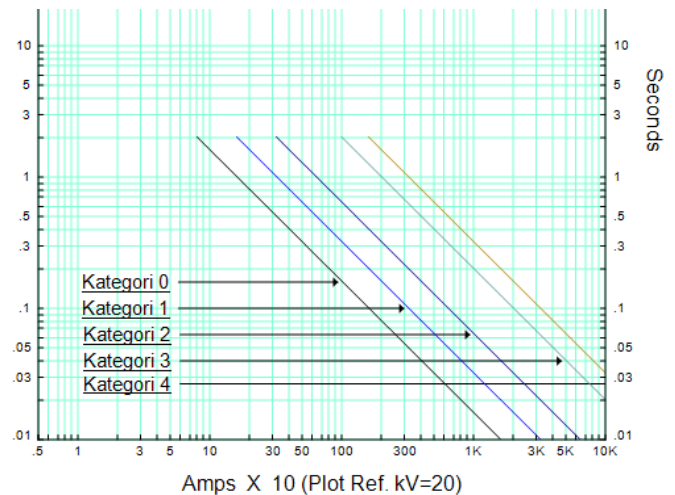
Untuk PPE kategori 4 nilai E = 167,36 J/cm² maka,

$$t = \frac{ED^2}{2,142 \times 10^6 VI_{bf}}$$

$$t = \frac{167,36 \times 910^2}{2,142 \times 10^6 \times 20 \times I_{bf}}$$

$$t = 3,235 \times I_{bf}^{-1}$$

Dari setiap persamaan hubungan arus-waktu tersebut diubah kedalam kurva sebagai berikut :berikut:



Gambar 3. Plotting kurva batasan energi untuk tegangan lebih dari 15kV

3. Penentuan Jarak Aman Batas Perlindungan

Pada perhitungan jarak aman batas perlindungan persamaan yang digunakan untuk level tegangan 1-15 kV adalah sebagai berikut:

Untuk PPE kategori 0, Ewd = 8,36 J/cm² :

$$D_B = \frac{D_{WD}}{\sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{\sqrt{\frac{5}{8,36}}} = 1543,378 \text{ mm} = 1,543 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 1, Ewd = 16,74 J/cm² :

$$D_B = \frac{D_{WD}}{\sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{\sqrt{\frac{5}{16,74}}} = 3150,571 \text{ mm} = 3,151 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 2, Ewd = 33,47 J/cm² :

$$D_B = \frac{D_{WD}}{\sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{\sqrt{\frac{5}{33,47}}} = 6421,541 \text{ mm} = 6,421 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 3, Ewd = 104,6 J/cm² :

$$D_B = \frac{D_{WD}}{\sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{\sqrt{\frac{5}{104,6}}} = 20713,221 \text{ mm} = 20,713 \text{ meter}$$

Untuk PPE kategori 4, Ewd = 167,36 J/cm² :

$$D_B = \frac{D_{WD}}{\sqrt{\frac{E_B}{E_{WD}}}} = \frac{910}{\sqrt{\frac{5}{167,36}}} = 33576,219 \text{ mm} = 33,576 \text{ meter}$$

Adapun untuk jarak batas aman perlindungan pada level tegangan lebih dari 15 kV adalah sebagai berikut:

